Untersuchungen an abbildenden Spiegelsystemen für Röntgenstrahlen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Julius-Maximilians-Universität
zu Würzburg

Vorgelegt von
Diplom-Physiker
Günter Hildenbrand
aus Würzburg

Referent: Prof.Dr.H.Kulenkampff

Tag der mündl. Prüfung:
23. Juli 1956

Würzburg 1956

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Untersuchungen an abbildenden Spiegelsystemen für Röntgenstrahlen.

1. Einleitung

Da die Wechselwirkung zwischen Röntgenstrahlen und Materie aussagenreiche Abbildungen mikroskopischer Objekte erwarten läßt, besteht großes Interesse an Einrichtungen, die mittels Röntgenstrahlen vergrößerte Bilder solcher Objekte mit guter Auflösung liefern. Die physikalischen Möglichkeiten zur Erzeugung von Abbildungen bestehen in der Aufnahme der Objekte in unmittelbarem Kontakt mit photographischen Feinstkornschichten, der sog. Mikroradiographie (1,2), in der Punktprojektion der Objekte von einem sehr kleinen Röntgenbrennfleck auf in endlicher Entfernung angeordnete Photoschichten, der sog. Röntgenschattenmikroskopie (3), und in der Verwendung echter Optiken für Röntgenstrahlen. Zu letzteren gehören Kristalloptiken mit Braggscher Reflexion (4,5) und totalreflektierende Spiegelsysteme (6, 7, 8, 9, 10). Aus verschiedenen Gründen sind totalreflektierende Röntgenoptiken für sehr langwellige Röntgenstrahlen, welche aus Kontrastgründen für die Untersuchung biologischer Objekte erforderlich sind, besonders geeignet (11) und unter diesen interessieren aus geometrisch-optischen Gründen vor allem die rotationssymmetrischen Spiegelsysteme (8, 9, 10).

2. Rotationssymmetrische aplanatische Spiegelsysteme für streifend einfallende Strahlen

Theoretische Grundlagen und Ergebnisse.

Bei der Berechnung totalreflektierender Spiegelsysteme für Röntgenstrahlen besteht das Problem darin, die für aplanatische Abbildungen maßgebliche Abbesche Sinusbedingung mit der Bedingung streifenden Einfalls zu vereinbaren, da Röntgenstrahlen nur bei nahezu streifendem Einfall auf die Spiegelflächen totalreflek-

tiert werden. Es zeigt sich, daß die gleichzeitige Erfüllung beider Bedingungen bei einer einzelnen Spiegelfläche nicht möglich ist, sondern daß erst Spiegelsysteme aus mindestens zwei Spiegelflächen aplanatische Abbildungseigenschaften für streifend einfallende Strahlen haben (9). Streng aplanatische Spiegelsysteme (8, 10) bestehen aus Flächen höherer Ordnung, aber auch schon bei Flächen 2. Ordnung wird die Sinusbedingung mit guter Näherung erfüllt. Besonders ausgezeichnet unter den letzteren sind Kegelschnittflächen in konfokaler Lage, d.h. Flächen, deren Erzeugende Kegelschnitte sind, die jeweils einen ihrer beiden Brennpunkte gemeinsam haben (9). Die einzelnen Spiegelflächen sind die Oberflächen innen reflektierender Hohlkörper und wegen des erforderlichen streifenden Einfalls der Strahlung sind letztere bei kleinen Durchmessern sehr langgestreckt.

Die Aperturen sind Ringaperturen und liegen in der Größenordnung 0,005 bis 0,05 rd., so daß sich beugungstheoretische Auflösungsgrenzen je nach der Wellenlänge der Röntgenstrahlen von 30 bis 300 mμ ergeben. Damit diese Werte auch praktisch erreicht werden können, sind sehr hohe Formgenauigkeiten bei den einzelnen asphärischen Spiegelflächen erforderlich. Andererseits brauchen die Oberflächenunregelmäßigkeiten im Kleinen, die sich als Rauhigkeit bemerkbar machen, trotz der kleinen Wellenlängen der Röntgenstrahlen wegen des streifenden Einfalls nicht kleiner sein als diejenigen sehr guter Spiegelflächen für nahezu senkrecht einfallendes sichtbares Licht.

Herstellung der Spiegelsysteme.

Da die innen reflektierenden Rotationskörper, aus denen die Spiegelsysteme bestehen, wegen ihrer kleinen Durchmesser bei relativ großer Baulänge nur sehr schwer zugänglich sind, wurden zunächst die zu den Hohlkörpern reziproken Massivkörper, die sog. Negativkörper hergestellt, aus denen im Abdruckverfahren die eigentlichen Spiegelkörper, die sog. Positivkörper gewonnen werden konnten.

Da die Kegelschnittprofile asphärische Rotationsflächen ergeben, schieden die für die Herstellung sphärischer Flächen geeigneten Verfahren der optischen Industrie, welche sehr hohe Formgenauigkeiten zu erreichen gestatten, aus. Da es außerdem zunächst darauf ankam, die grundsätzliche Brauchbarkeit rotationssymmetrischer Spiegelsysteme für eine Abbildung mittels streifend einfallender Strahlen zu untersuchen, wurden für die Herstellung der Negativkörper Profilschleifmethoden angewandt, mit deren Hilfe man beliebig geformte Profile herstellen kann, wobei aber erheblich geringere als optische Genauigkeiten erzielt werden und auch die Oberflächenqualität durch nachfolgendes Läppen und Polieren von Hand noch beträchtlich verbessert werden muß. Für die Herstellung der Negativkörper für das Hyperboloid bzw. Ellipsoid eines Zweispiegelsystems mit geringer Eigenvergrößerung wurde eine Profilschleifmaschine mit mechanischer Abtastung einer von Hand gefertigten, sechsfach vergrößerten Metallschablone, für die Herstellung der Negativkörper für das Hyperboloid bzw. Ellipsoid eines Zweispiegelsystems mit stärkerer Eigenvergrößerung eine optische Profilschleifmaschine mit einer 50-fach vergrößerten Zeichenvorlage eingesetzt. Die erhaltenen Negativkörper wurden unter ständiger Kontrolle in einem Zweikoordinaten-Meßkomparator durch Läppen von Hand noch formverbessert und durch nachfolgendes Polieren ohne merkliche Gestaltänderung wurde die Oberflächenrauhigkeit bis auf metallischen Hochglanz verringert. Oberflächenuntersuchungen wurden mit Hilfe von Tastnadelgeräten [1] (12, 13) und nach dem Verfahren der Vielfachstrahlinterferometrie [2] (14) durchgeführt.

Von den erhaltenen Negativkörpern wurden im Kunststoffabdruckverfahren die eigentlichen Spiegelkörper hergestellt, deren Innenflächen die Außenflächen der Negativkörper unter Beibehaltung von deren Formgenauig-

---

[1] Verf. dankt Dr.Böhm und Dipl.Phys.Schier in Fa.Kugelfischer, Schweinfurt und der Fa.Hommel-Werke, Mannheim.

[2] Verf. dankt Dr.Kimmel, Siemens-Schuckertwerke AG., Erlangen.

keit und Oberflächenqualität wiedergaben. Die Anwendung eines in der Glastechnik in anderem Zusammenhang bekannten Glasabdruckverfahrens (15), durch die aus den metallischen Negativkörpern Positivkörper aus Glas erhalten werden konnten, wurde ebenfalls untersucht, erwies sich aber für die an das Abdruckverfahren zu stellenden hohen Anforderungen als ungeeignet.

Wegen der Absorption der Röntgenstrahlen im Material der Spiegelflächen ist die "Totalreflexion" keine 100 %ige Reflexion, sondern das Reflexionsvermögen ist bei gegebenem Einfallswinkel von der Wellenlänge der Röntgenstrahlen und von der Ordnungszahl des Reflektormaterials abhängig. Die Abhängigkeit des Reflexionsvermögens von der Wellenlänge, der Ordnungszahl und der Schichtdicke des aufgedampften Reflektormetalls wurde im Wellenlängenbereich 1,8 bis 3,2 ÅE an ebenen Reflektoren aus Kunststoff, Glas und aufgedampften Schichten aus Al, Cu, Ag, Au experimentell untersucht.

Die im Kunststoffabdruckverfahren gewonnenen Spiegelkörper wurden dann auf ihren Innenflächen im Hochvakuum mit einige hundert ÅE dicken Goldschichten bedampft.

Lichtoptische Prüfung der Spiegelsysteme.

Da von den Spiegelsystemen höhere Formgenauigkeiten gefordert werden müssen als man sie mittels der besten mechanischen Meßmethoden noch erfassen kann, wurde nach einem Vorschlag von Wolter (16) eine lichtoptische Prüfeinrichtung aufgebaut, die von Schlieren- und Phasenkontrastverfahren Gebrauch macht. Da die Prüfeinrichtung gleichzeitig der Überwachung der letzten Schritte zur Verbesserung der Formgenauigkeit der Spiegelflächen dienen soll, ist sie so eingerichtet, daß sie die durch die Formfehler verursachten Abbildungsfehler anzeigt und es gleichzeitig gestattet, den Abbildungsfehlern die sie verursachenden, falsch liegenden Flächenelemente und Zonen der Spiegelflächen zuzuordnen. Die zu prüfenden Optiken (Linsen- oder Spiegelsysteme) sind dabei unmittelbar als optische Elemente im Strahlengang angeordnet. Durch sinnvolle

Abstufung der einzelnen Prüfschritte ist es, ausgehend von den Schlierenverfahren und endend bei den Phasenkontrastverfahren, möglich, die mit zunehmender Formverbesserung der zu prüfenden Optiken immer kleineren Abweichungen von den jeweiligen Sollflächen bis zu Werten von $\lambda/100$ zu erfassen, wobei λ die Wellenlänge des in der Prüfeinrichtung verwendeten Lichtes ist. Die Prüfeinrichtung wurde an Optiken für sichtbares Licht (Photo- und Mikroobjektive) erprobt und dann zur Beurteilung der erreichten Genauigkeiten bei den Einzelspiegeln und Spiegelsystemen für streifend einfallende Strahlen eingesetzt.

Grundsätzlich ist die Prüfeinrichtung auch zur direkten Prüfung der Negativkörper brauchbar, doch müssen dann zusätzliche Hilfsoptiken verwendet werden, da die reflektierenden Außenflächen der Negativkörper keine sammelnden, sondern zerstreuende Eigenschaften haben.

Lichtoptische Untersuchungen der Spiegelsysteme.

Die auf die unter "Herstellung der Spiegelsysteme" beschriebene Weise versuchsweise hergestellten Einzelspiegelsysteme wurden mit sichtbarem Licht auf ihre Abbildungseigenschaften hin untersucht, um eine grundsätzliche experimentelle Bestätigung der Ergebnisse der theoretischen Berechnungen (8, 9, 10) zu erzielen und Aussagen über Zusammenhänge zwischen der erreichten Formgenauigkeit und der damit erzielbaren Abbildungsqualität zu gewinnen. Vor allem wurden die Bündelquerschnitte in verschiedenen Abständen von den Brennpunkten und die Zerstreuungsfiguren achsialer und außerachsialer Lichtpunkte in den Fokussierungs- bzw. Abbildungsebenen der Einzelspiegel bzw. Spiegelsysteme aufgenommen, wobei die der Berechnung der Spiegelsysteme zugrunde gelegten Erwartungen im Rahmen der bei den Versuchskörpern erreichten Formgenauigkeiten bestätigt werden konnten.

Schließlich wurden ein einfaches Maschengitter und einige mikroskopische Testdiatomeen mittels sichtbaren Lichtes über die versuchsweise hergestellten Zweispiegelsysteme abgebildet.

3. Vorbereitende Untersuchungen mit Röntgenstrahlen

Strahlungsquelle.

Da für die Untersuchung biologischer Objekte sehr langwellige Röntgenstrahlen erforderlich sind und die rotationssymmetrischen, totalreflektierenden Spiegelsysteme wegen ihrer Ringaperturen ohnehin eine spezielle Anodenform verlangen, wurde eine besondere Röntgenröhre entwickelt, die trotz niedriger Spannungen eine möglichst große Strahlungsintensität liefert.

Über die erforderliche Strahlungsleistung der Röntgenstrahlenquelle wurde eine Abschätzung angestellt. Dabei wurde - ausgehend von der am Ort des Bildes für eine bestimmte Schwärzung einer gegebenen Photoschicht erforderlichen Energiedichte - über die Reflexionsverluste am Objektiv die in der Objektebene erforderliche Energiedichte und von hier aus über die Reflexionsverluste am Kondensor die vom Brennfleck der Strahlungsquelle in den gesamten Raum auszustrahlende Energie berechnet, wobei unter Berücksichtigung der Absorption in der Antikathode (17) vor allem dem Umstand Rechnung getragen wurde, daß von der in den gesamten Raum ausgestrahlten Energie nur ein ganz bestimmter, kleiner Anteil von der wirksamen Kondensorapertur ausgenützt wird. Insgesamt ergab die Abschätzung, daß für Belichtungszeiten der Größenordnung Sekunden eine Brennfleckbelastung von etwa 220 kW . cm^{-2} erforderlich ist, wenn der nutzbare Strahlenkegel unter einem mittleren Winkel von 6° aus der Anodenoberfläche (flacher Hohlkegel) austritt und der gesamte Strahlengang im Vakuum verläuft. Dieser Wert ist durchaus kein Extremwert, so daß auch die Unterbringung der Objekte in Luft möglich ist, wenn der Hauptteil des Strahlenganges im Vakuum verbleibt.

Die entwickelte Röntgenröhre besitzt eine Hohlkegelanode, in deren Achse die Kathodenwendel angeordnet ist. Die Anode besteht aus einem Kupferkörper, in den auswechselbare Anodeneinsätze aus verschiede-

nen Metallen eingefügt werden können, und ist wassergekühlt. Die gesamte Röhre ist baukastenartig aufgebaut und liegt an einer Diffusionspumpe. Die Spannung wird von einem Transformator erzeugt, über vier Quecksilberventile gleichgerichtet und über eine Kapazität geglättet; die Belastbarkeit der Gesamtanlage beträgt 10 kW.

Untersuchungen an einem Zweispiegelkondensor

Um die Brauchbarkeit des Zweispiegelsystems geringer Eigenvergrößerung als Röntgenkondensor zu prüfen, wurde dieses System in verkleinerndem Sinne in Verbindung mit der Strahlungsquelle mit Röntgenstrahlen untersucht, wobei die Bündelquerschnitte des nur einmal am Ellipsoid und des zweimal, erst am Ellipsoid und dann am Hyperboloid, reflektierten Strahlenbündels in verschiedenen Abständen von den Fokussierungsebenen des einfach und des doppelt reflektierten Strahlenbündels aufgenommen wurden. Es zeigte sich eine völlige Übereinstimmung mit den Ergebnissen der entsprechenden lichtoptischen Untersuchung. Durch Verwendung des Röntgenkondensors als schwach vergrößerndes Objektiv konnte eine Abbildung zweier gekreuzter, 100 µ dicker Kupferdrähte mit Röntgenstrahlen erzielt werden.

4. Ausblick

Die vorliegenden Untersuchungen haben die theoretischen Überlegungen über rotationssymmetrische Spiegelsysteme für streifend einfallende Strahlen und die Brauchbarkeit dieser Systeme für langwellige Röntgenstrahlen grundsätzlich bestätigt und gezeigt, welche Anforderungen an die Genauigkeit und Oberflächenqualität der Spiegelsysteme gestellt werden müssen, wenn mit ihnen mikroskopische Abbildungen hoher Auflösung mittels Röntgenstrahlen erzielt werden sollen.

Der Verfasser dankt den Siemens-Reiniger-Werken AG für die Bereitstellung der erforderlichen Mittel zu dieser Arbeit und besonders Herrn Dir. W.Gellinek für sein förderndes Interesse. Herrn Prof.Dr. H.Kulenkampff gebührt Dank für wertvolle Hinweise und für die Anteilnahme, mit der er den Fortgang der Arbeit verfolgt hat. Herr Prof.Dr. H.Wolter hat die Arbeit durch anregende Diskussionen gefördert.

Literatur

(1) Engström, A.: Acta Radiol.,Suppl. 63, 1-106, 1946.

(2) Lindström, B: Acta Radiol.,Suppl.125, 1-206, 1955.

(3) Cosslett, V.E. and Nixon, W.C.: Journ.appl.Phys. 24 (1953), 616-623.

(4) Hoppe, W. und Trurnit, H.J.: Zeitschr.Naturforschg. 2a (1947), 608-615.

(5) Thathachari, Y.T. and Ramachandran, G.N.: Journ.Ind. Inst.Sci. A 34 (1952), 67-73.

(6) Kirkpatrick, P. and Baez, A.V.: Journ.Opt.Soc.Am. 38 (1948), 766-774.

(7) Montel, M.: Optica Acta 1 (1954), 117-126.

(8) Herrnring, G. und Weidner, W.: Unveröffentlicht, 1952.

(9) Wolter, H.: Ann.Phys. 10 (1952), 94-114.

(10) Wolter, H.: Ann.Phys. 10 (1952),286-295.

(11) Hildenbrand, G.: Fortschr.Phys. 4 (1956), 1-32.

(12) Forster, A.: Werkstattstechn. u.Maschinenbau 39 (1949), 161-166.

(13) Perthen, J.: VDI-Zeitschr. 96 (1954), 855-865.

(14) Tolansky, S.: Multiple-Beam Interferometry. Clarendon Press, Oxford 1948.

(15) Küppers, K.: DRP 292 737, erteilt am 10.9.1912.

(16) Wolter, H.: Unveröffentlichter Kurzbericht, 1952.

(17) Kulenkampff, H. und Schmidt, L.: Ann.Phys. 43 (1943), 494-512.